

# 薄膜体声波谐振器的梯形射频滤波器设计

汤 亮, 郝震宏, 乔东海, 汪承灏

(中国科学院声学研究所声学微机电实验室, 北京 100080)

**摘要:** 从 Mason 等效电路模型出发, 研究了基于薄膜体声波谐振器的梯形结构射频滤波器的设计。以往的研究中都没有考虑到介质的声损耗, 这样得到的滤波器频响中就未计入插入损耗的影响。采用射频网络方法对薄膜体声波谐振器建模, 并在模型中加入了介质声损耗的影响, 然后就基于薄膜体声波谐振器的梯形射频滤波器的传输响应、带宽、插入损耗、阻带抑制以及带内波纹情况进行了分析和讨论。

**关键词:** 滤波器; 双工器; 振荡器; 射频微机电系统; 薄膜体声波谐振器

**中图分类号:** TN713, TN015, TN454

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-3630(2008)-02-0145-05

## Design of ladder-type RF filters based on FBARs

TANG Liang, HAO Zhen-hong, QIAO Dong-hai, WANG Cheng-hao

(MEMS laboratory of the Institute of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Design of ladder-type RF filters based on the film bulk acoustic resonators (FBARs) is presented based upon Mason equivalent circuit model. Previous work did not take acoustic attenuation in the medium into account; therefore the effect of media loss on the obtained filter frequency response was neglected. Considering acoustic attenuation of the medium, the RF network method is used in filter modeling. Some key problems in filter design, such as transmission response, bandwidth, insertion loss, out-band rejection and passband ripples are investigated and analyzed.

**Key words:** filter; duplexer; oscillator; RF MEMS; FBAR

## 1 引 言

现在手机所用的射频滤波器主要是声表面波滤波器和陶瓷滤波器。声表面波滤波器存在三个方面的不足: 一是其功率承受能力的限制, 即声表面波滤波器不能承受很大的微波功率。这对射频发射是一个很大的缺陷; 二是其工作频率限制在 1GHz 左右。高于这个频率时, 在工艺上制作声表面波滤波器的插指电极非常困难, 这就限制了其在新通讯标准中的应用; 三是声表面波滤波器用的压电晶体和 IC 电路制作工艺不兼容, 很难实现与后续电路的单

片集成, 体积上无法做小。而陶瓷滤波器虽能达到所要求的性能, 但其缺点在于体积过大, 无法满足小型化的需求。基于 MEMS 技术的薄膜体声波谐振器 (FBAR) 具有 Q 值高、尺寸小以及加工工艺可与 CMOS 工艺兼容的特点, 可工作在 500MHz~20GHz 的频段内, 因此有很好的应用前景<sup>[1]</sup>。

FBAR 器件是一种制作在硅或者砷化镓衬底上, 主要由金属电极-压电薄膜-金属电极构成的三明治结构, 其工作基于压电薄膜厚度方向纵振动引起的谐振。S.V.Krishnaswamy 等人的一篇综述文章中详细说明了 FBAR 器件的主要结构、材料以及工艺, 并介绍了 FBAR 器件在滤波器方面的应用<sup>[2]</sup>。Agilent 公司的 R.Ruby 等人在 2001 年成功研制出了基于 FBAR 的双工滤波器<sup>[3]</sup>, 并促使 Agilent 公司在 2002 年的时候对其进行了商业化生产, 从而在世界范围内引发了对 FBAR 研究的热潮。在模型分析方面, 较常用的主要有一维 Mason 等效电路模型<sup>[4]</sup>

收稿日期: 2007-04-25; 修回日期:

基金项目: 国家自然科学基金 (90607012)

作者简介: 汤亮 (1981-), 男, 江苏人, 博士研究生, 研究方向: FBAR 及 RF MEMS, 声学 MEMS。

通讯作者: 汤亮, E-mail: tangliang@mail.ioa.ac.cn; lshanbing@pku.org.cn

和 Larson 等人提出的 MBVD 模型<sup>[5]</sup>。一般而言,采用 MBVD 模型在对基于 FBAR 的滤波器设计时更为方便,KMLakin 等人采用 BVD 模型对基于 FBAR 的梯形滤波器进行了详细的分析<sup>[6]</sup>。但是由于 BVD 模型只能描述 FBAR 在谐振频率附近的特性,在对 FBAR 器件进行全波段分析时不如一维 Mason 等效电路模型精确。本文采用一维 Mason 等效电路模型,并利用射频网络方法对单个 FBAR 器件进行建模,在模型中加入了介质声损耗的影响。在此基础上详细研究了基于薄膜体声波谐振器的梯形滤波器的原理和设计,并就设计中滤波器的传输响应、带宽、插入损耗、阻带抑制以及带内波纹情况进行了分析和讨论。

## 2 FBAR 器件仿真模型建立

薄膜型 FBAR 器件的声学回路主要包括四层结构:顶电极、压电层、底电极以及支持层,如图 1 所示。其相应 Mason 等效电路如图 2 所示。

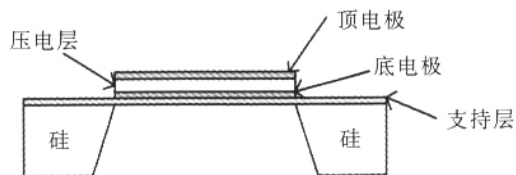


图 1 薄膜型 FBAR 器件结构示意图

Fig.1 Schematic view of FBAR

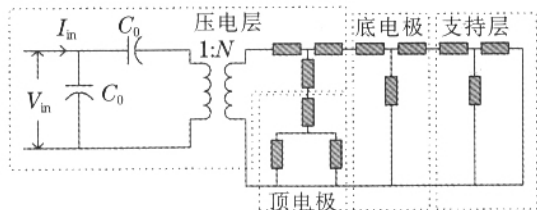


图 2 FBAR 器件 Mason 等效电路图

Fig.2 The Mason equivalent circuit of FBAR

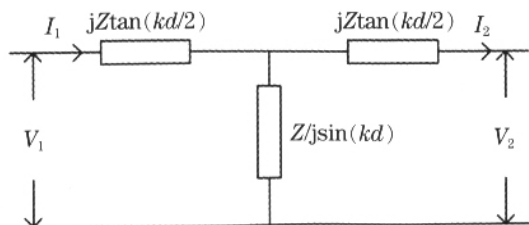


图 3 FBAR 器件力学层对应的等效电路

Fig.3 The equivalent circuit of each mechanical layer of FBAR

对于如图 3 所示的 FBAR 器件力学层对应的等效电路,采用 ABCD 网络方法进行级联计算,有:

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(kd) & jZ\sin(kd) \\ \frac{j\sin(kd)}{Z} & \cos(kd) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中,  $Z$  为该层的声阻抗,  $k$  为该层厚度方向纵波对应的波数,  $d$  为该层的厚度。当考虑介质的声损耗时,  $k$  是一个复数<sup>[7]</sup>, 且满足:

$$k = k_r - j\alpha \quad (2)$$

其中,  $k_r = 2\pi f/V$ ,  $\alpha$  为损耗系数。 $f$  为频率,  $V$  是该层厚度伸缩方向对应的纵波波速。 $\alpha$  与频率  $f$  的平方成正比。压电层可采用类似的方法进行级联。将式(2)代入  $\cos(kd)$  和  $\sin(kd)$  中, 有:

$$\begin{aligned} \cos(kd) &= \cos(k_r d) (e^{\alpha d} + e^{-\alpha d})/2 + \\ &\quad j\sin(k_r d) (e^{\alpha d} - e^{-\alpha d})/2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sin(kd) &= \sin(k_r d) (e^{\alpha d} + e^{-\alpha d})/2 - \\ &\quad j\cos(k_r d) (e^{\alpha d} - e^{-\alpha d})/2 \end{aligned} \quad (4)$$

将式(3)和式(4)代入式(1)中, 即可得到每一层的 ABCD 参数。最后将图 2 所示的网络各部分级联起来, 就可以得到整体的 ABCD 参数。即:

$$\begin{pmatrix} V_m \\ I_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{out} \\ I_{out} \end{pmatrix} \quad (5)$$

由于 FBAR 器件一端声学短路, 即输入阻抗公式为:

$$Z_{in} = B/D \quad (6)$$

## 3 基于 FBAR 器件的梯形滤波器仿真与分析

### 3.1 基于 FBAR 器件的梯形滤波器工作原理

图 4 给出了以 FBAR 器件为基元的梯形滤波器的拓扑结构。对于给定中心频率  $f_0$  和通带宽度  $\Delta f$  的滤波器, 可以由二种不同频率的 FBAR 器件通过串/并连接来实现。其中位于串联臂的 FBAR 器件的串联谐振频率 ( $f_{series,s}$ ) 及并联谐振频率 ( $f_{series,p}$ ) 分别为  $f_0$  和  $f_0 + \Delta f/2$ ; 而位于并联臂的 FBAR 器件的串联谐振频率 ( $f_{shunt,s}$ ) 及并联谐振频率 ( $f_{shunt,p}$ ) 分别为  $f_0 - \Delta f/2$  和  $f_0$ 。从图 4 可以看出, 当输入信号  $V_{in}$  工作在频率  $f_0$  时, 谐振频率为  $f_0$  的串联臂 FBAR 器件工作在谐振状态, 这些谐振器呈低阻状态, 而并联臂 FBAR 器件偏离谐振状态, 呈现高阻状态, 因此, 频率为  $f_0$  的信号从  $V_{in}$  传输到  $V_{out}$  没有大的衰减; 反之, 对于频率为  $f_0 - \Delta f/2$  的信号, 由于此时并联臂 FBAR 器件呈低阻状态, 而串联臂 FBAR 器件呈现高阻, 因此, 频率为  $f_0 - \Delta f/2$  的信号从  $V_{in}$  传输到  $V_{out}$  将经历多次衰减。这样, 便实现了信号的滤波<sup>[8]</sup>。

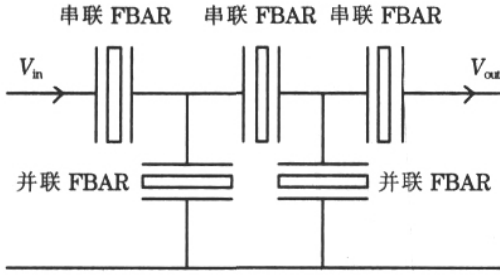


图 4 基于 FBAR 的梯形滤波器拓扑结构  
Fig.4 The topology structure of ladder-type filter based on FBARs

### 3.2 FBAR 器件谐振特性仿真

采用 2 中所述的模型,对组成梯形滤波器的串联臂 FBAR 器件和并联臂 FBAR 器件进行了仿真,所用的材料参数及厚度如表 1<sup>[9]</sup>和表 2 所示。其中氮化硅膜的声损耗由于缺乏文献记载,暂认为是零,导致的结果是仿真得到的插入损耗值略偏小,但不影响分析。

表 1 模拟中采用的材料参数

Table 1 Material properties used in simulation

| 材料               | $Z/(\text{kg/m}^2\text{s}) \times 10^4$ | $\alpha/(\text{dB/m}@1\text{GHz})$ | $V/(\text{m/s})$ | $K_t^2$ | $\epsilon$ |
|------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|------------------|---------|------------|
| Au               | 6600                                    | 17760                              | 3200             | 0       | 1          |
| ZnO              | 3550                                    | 2500                               | 6340             | 0.078   | 8.8        |
| Au               | 6600                                    | 17760                              | 3200             | 0       | 1          |
| SiN <sub>x</sub> | 3579                                    | 未找到文献记载                            | 11000            | 0       | 1          |

表 2 模拟中采用的 FBAR 器件各层材料厚度

Table 2 material thickness of FBARs used in simulation

|          | 顶电极<br>厚度/ $\mu\text{m}$ | 压电膜<br>厚度/ $\mu\text{m}$ | 底电极<br>厚度/ $\mu\text{m}$ | 支持膜<br>厚度/ $\mu\text{m}$ |
|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 串联臂 FBAR | 0.100                    | 1                        | 0.1                      | 0.5                      |
| 并联臂 FBAR | 0.125                    | 1                        | 0.1                      | 0.5                      |

图 5 为模拟得出的串联臂及并联臂 FBAR 器件的阻抗和相位图,串联臂 FBAR 器件的串联谐振频率  $f_{\text{series},s}$  约为 1.6190GHz,并联谐振频率  $f_{\text{series},p}$  约为 1.6801GHz; 并联臂 FBAR 器件的串联谐振频率  $f_{\text{shunt},s}$  约为 1.5539GHz,并联谐振频率  $f_{\text{shunt},p}$  约为 1.6127GHz。相应的有效机电耦合系数及  $Q$  值由以下公式得出<sup>[10]</sup>:

$$k_{\text{eff}}^2 = \frac{(\pi/2)(f_s/f_p)}{\tan[(\pi/2)(f_s/f_p)]} \quad (7)$$

$$Q_{s,p} = \frac{f_x}{2} \frac{d\angle Z_{\text{in}}}{df} \Big|_{f_x=f_{s,p}} \quad (8)$$

得到串联臂 FBAR 器件有效机电耦合系数约为 8.67%,串联谐振频率处  $Q$  值约为 614,并联谐振频率处  $Q$  值约为 611; 并联臂 FBAR 器件有效机电耦合系数约为 8.68%,串联谐振频率处  $Q$  值约为 623,并联谐振频率处  $Q$  值约为 615。

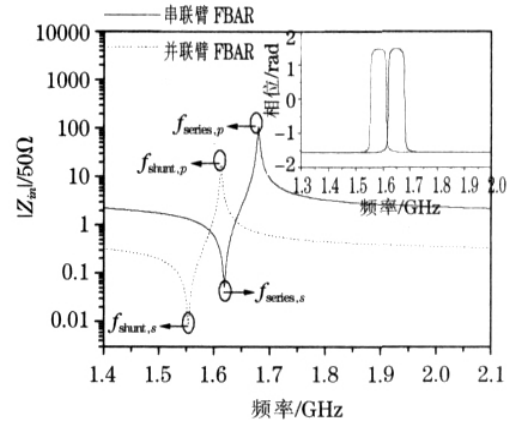


图 5 串联臂及并联臂 FBAR 器件阻抗和相位图  
Fig.5 The electrical impedance and phase of series and shunt FBARs

### 3.3 基于 FBAR 器件的梯形滤波器仿真基础

为了使梯形滤波器传输响应( $S_{21}$ )关于中心频率  $f_0$  对称,设计时应满足如下条件<sup>[6]</sup>:

$$\frac{1}{(2\pi f_0)^2 \frac{\epsilon_{\text{series}} \epsilon_0 S_{\text{series}}}{d_{\text{series}}} \cdot \frac{\epsilon_{\text{shunt}} \epsilon_0 S_{\text{shunt}}}{d_{\text{shunt}}}} = R^2 \quad (9)$$

其中  $\epsilon_0$  为真空中介电常数,  $\epsilon_{\text{series}}$  和  $\epsilon_{\text{shunt}}$  分别为串联臂及并联臂 FBAR 器件压电材料的相对介电常数,  $S_{\text{series}}$  和  $S_{\text{shunt}}$  分别为串联臂及并联臂 FBAR 器件的有效面积,  $d_{\text{series}}$  和  $d_{\text{shunt}}$  分别为串联臂及并联臂 FBAR 器件的压电层厚度,  $R$  为系统的特征阻抗。在我们的分析中,  $R$  为  $50\Omega$ ,  $f_0$  约为 1.61GHz,  $d_{\text{series}}$  和  $d_{\text{shunt}}$  均为  $1\mu\text{m}$ ,  $\epsilon_{\text{series}}$  和  $\epsilon_{\text{shunt}}$  均为 8.8, 因此根据式 (9) 可以得到:

$$S_{\text{series}} \cdot S_{\text{shunt}} = 6.4 \times 10^{-16} \quad (10)$$

在设计中应当满足式(10)。

选择  $S_{\text{series}}$  为  $1 \times 10^{-8}\text{m}^2$ ,  $S_{\text{shunt}}$  为  $6.4 \times 10^{-8}\text{m}^2$ , 模拟得到的串联臂 FBAR 器件和并联臂 FBAR 器件的 Smith 图如图 6 所示。

以上述两种 FBAR 器件分别作为串联臂和并联臂,我们模拟了 1 级梯形滤波器的特性,其传输响应和回波损耗如图 7 所示。插入损耗约为 -0.49dB,带外抑制约为 -12.1dB,3dB 带宽约为 57.7MHz,矩形系数(6dB 带宽/3dB 带宽)约为 1.23。

### 3.4 串/并联臂静电容比对滤波器传输响应的影响

在满足式(10)条件下,我们分析了串联臂与并联臂 FBAR 器件具有不同静电容比时的情况。分析中滤波器均为 1 级梯形滤波器,其传输响应如图 8 所示,插入损耗、阻带抑制、3dB 带宽以及矩形系数情况如图 9 所示。

从图 8 和图 9 可以看到,对于 1 级梯形结构的



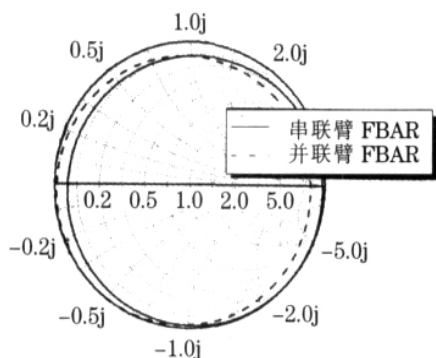


图6 串联臂及并联臂 FBAR 器件 Smith 图

Fig.6 The Smith chart of series and shunt FBARs

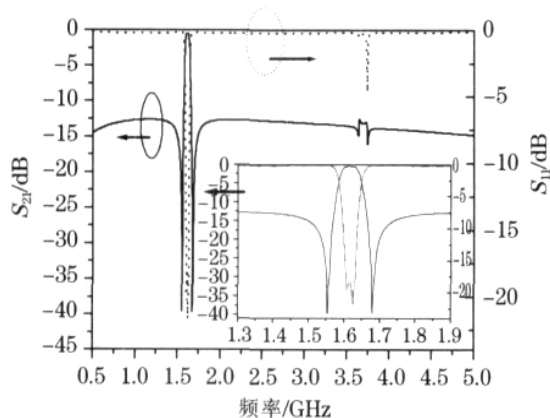


图7 基于 FBAR 的 1 级梯形滤波器宽带及窄带(右下角)

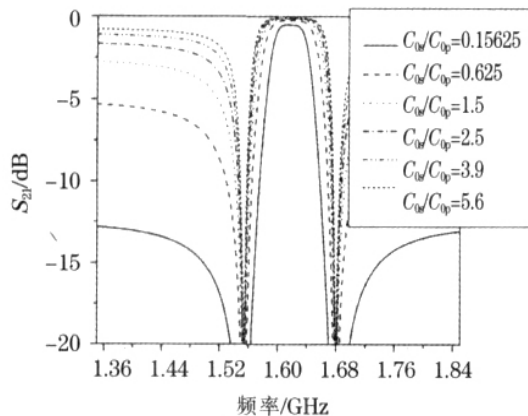
传输响应( $S_{21}$ )和回波损耗( $S_{11}$ )图Fig.7 The wideband transmission response ( $S_{21}$ ) and return loss ( $S_{11}$ ) of the 1-stage ladder-type filter based on FBARs (narrowband response shown at the right bottom)

图8 串联臂和并联臂 FBAR 器件具有不同静电容比时, 相应 1 级梯形滤波器的传输响应

Fig.8 The transmission response of the 1-stage ladder-type filter as the ratio of clamp capacitance of series and shunt FBARs varies.

射频滤波器来讲, 串联臂与并联臂 FBAR 器件静电容比值对带宽和阻带抑制的影响非常大。随着串联臂与并联臂 FBAR 器件静电容比值逐渐增大, 所构成的 1 级梯形滤波器插入损耗、阻带抑制以及矩形系数逐渐变小, 而 3dB 带宽逐渐增大。带内

很平坦, 基本没有波纹。在实际设计滤波器时, 一方面希望滤波器有足够大的带宽和足够小的插入损耗以满足所需频率信号的无损传输; 另一方面希望有足够大的阻带来抑制其他频率信号的传输; 还有希望矩形系数接近 1。因此需要对静电容比进行折中选择。

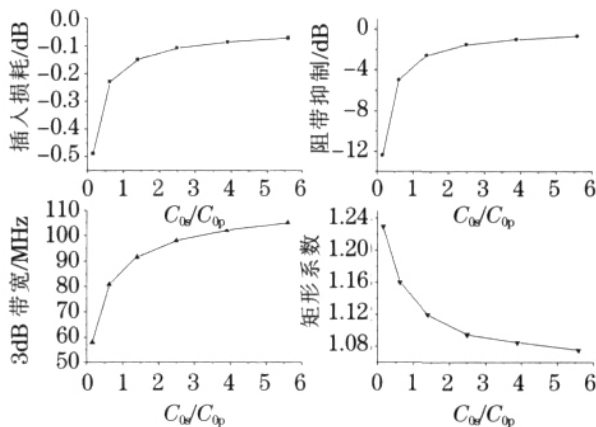


图9 串联臂和并联臂 FBAR 器件具有不同静电容比时, 相应滤波器的插入损耗、阻带抑制、3dB 带宽和矩形系数情况

Fig.9 The insertion loss, out band rejection, 3 dB bandwidth and shape factor of the filter as the ratio of clamp capacitance of series and shunt FBARs varies.

### 3.5 梯形结构级数对滤波器传输响应的影响

一般来讲, 1 级梯形滤波器往往不能满足滤波器在阻带抑制方面的要求, 这时可以通过增加滤波器级数来增大滤波器的阻带抑制。对 1 级到 4 级 4 种结构的滤波器进行了模拟分析, 传输响应如图 10 所示。其中选择  $S_{\text{series}}$  为  $1 \times 10^{-8} \text{m}^2$ ,  $S_{\text{shunt}}$  为  $6.4 \times 10^{-8} \text{m}^2$ 。

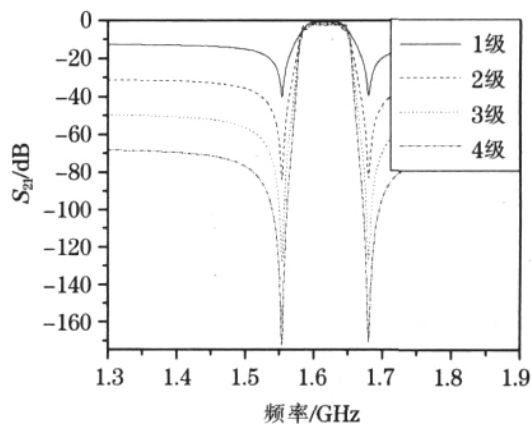


图10 不同级数的梯形滤波器传输响应

Fig.10 The transmission response of ladder-type filters with different stages

图 11 给出了不同级数梯形滤波器插入损耗和阻带抑制的情况。从图中可以看出每增加 1 级梯形单元, 可以提高约 12dB 的阻带抑制, 但代价是增加约 0.6dB 的插入损耗。另外, 可以看到随着滤波器级

数的增加, 开始出现了带内波纹。从图 12 所示带内局部放大图中可以看到, 1 级梯形滤波器带内平坦无波纹, 而 2 级、3 级以及 4 级梯形滤波器均出现带内波纹, 这是由于阻抗不匹配引起的, 可以通过加入匹配电路的方式改善。

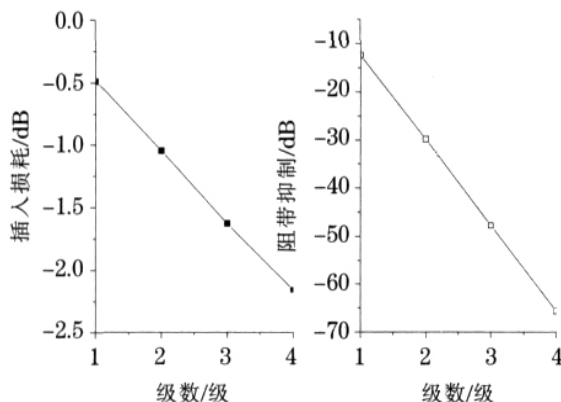


图 11 不同级数梯形滤波器插入损耗和阻带抑制情况

Fig.11 The insertion loss and out band rejection of ladder-type filters with different stages

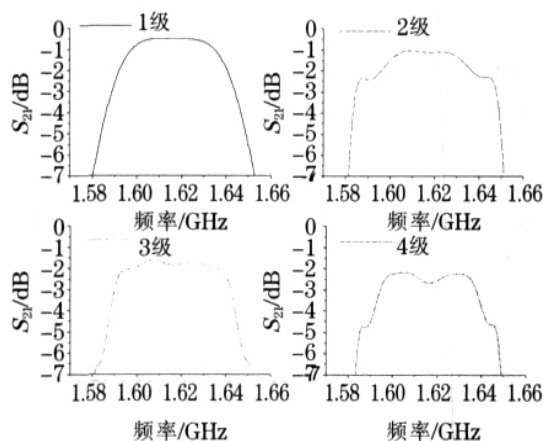


图 12 不同级数的梯形滤波器通带特性

Fig.12 The pass band characteristics of ladder-type filters with different stages

在实际设计滤波器时, 可以根据要求, 对串/并联臂 FBAR 器件的静电容比以及级数进行折中考虑, 从而设计出满足指定带宽、插入损耗、阻带抑制以及矩形系数的梯形滤波器。

## 4 小结与讨论

本文从薄膜体声波谐振器的结构及其 Mason 等效电路出发, 采用射频网络方法对单个 FBAR 器件进行了建模, 并在模型中加入了介质声损耗的影响。模拟的结果表明, 对基于 FBAR 的梯形射频滤波器的传输响应、带宽、插入损耗、阻带抑制以及带内波纹的分析基本合理。分析表明, 一方面, 随着梯

形滤波器串/并联臂 FBAR 器件的静电容比增大, 插入损耗、阻带抑制以及矩形系数逐渐减小, 而 3dB 带宽逐渐增大; 另一方面, 随着梯形滤波器级数的增加, 插入损耗和阻带抑制逐渐变大, 由于阻抗的不匹配, 带内逐渐出现波纹。在实际设计滤波器时, 应该根据实际要求对串/并联臂 FBAR 器件的静电容比以及滤波器级数进行折中考虑。带内波纹可以通过增加匹配电路的方法进行调节。本文的分析可以为实际设计基于 FBAR 的梯形滤波器提供一定的理论依据和指导。

这里需要说明的是, FBAR 器件的  $Q$  值由很多因素(如介质声损耗、压电膜的介电损耗、电极引线损耗和其它模式引起的损耗等)决定。我们的模型仅考虑了介质声损耗的影响, 并未考虑压电膜的介电损耗和电极引线损耗的影响。而其它模式引起的损耗需用三维模型来进行分析, 在我们的模型中也没有得到体现。因此, 我们对基于 FBAR 器件的梯形滤波器分析得出的插入损耗比实际值偏小。对 FBAR 器件更精确的建模将有助于对滤波器进行更合乎实际的设计, 我们将在下一步做这方面的工作。

## 参考文献

- [1] ZAHNG Hao, Jongjin Kim, PANG Wei, et al. 5GHz Low-phase-noise oscillator based on FBAR with low TCF[A]. Transducer 05. The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems[C]. 2005, 1: 1100-1101.
- [2] S V Krishnaswamy, J Rosenbaum, S Horwitz, et al. Film bulk acoustic wave resonator technology[J]. IEEE Ultrasonics Symposium, 1990, 1: 529-536.
- [3] Ruby R, Larson J D, Bradley P, et al. Ultraminiature high-Q filters and duplexers using FBAR technology[A]. IEEE ISSCC[C]. San Francisco, CA, USA, 2001: 120-121.
- [4] Mason W P. Physical acoustics principles & methods[M]. Vol. 1A, New York, Academic Press, 1964: 239-247.
- [5] J D Larson III. Modified butterworth-van dyke circuit for FBAR resonators and automated measurement systems[J]. Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, 2000, 1: 863-868.
- [6] Lakin K M. Modeling of thin film resonators and filters[A]. IEEE Microwave Symposium Digest, Albuquerque[C]. NM, 1-5 June, 1992: 149-152.
- [7] Auld B A. Acoustic fields and waves in solids[M]. Vol.1, New York, Wiley & sons, 1973: 86-97.
- [8] 乔东海. 基于 MEMS 技术的微波(RF)滤波器的设计[J]. 中国机械工程, 2005, 16(z1): 158-160.
- [9] QIAO Donghai. MEMS RF filter design[J]. China Mechanical Engineering, 2005, 16(z1): 158-160.
- [10] Farina M, Rozzi T. Electromagnetic modeling of thin-film bulk acoustic resonators[J]. IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, 2004, 52(11): 2496-2502.
- [11] Joseph J L, Rajan S N, Rief R, Charles G S. A sealed Cavity TFR Process for RF Bandpass filters[A]. IEDM 96 [C]. 1996: 441-444.